

30kVA 주상 변압기의 정격 부하에 의한 열분포에 관한 연구

김민규*, 김정태, 구자윤, 송기동, 조연옥, 하복남
 한양 대학교 한국 전기연구소 한전 기술 연구원

A Study on the Thermal distribution of the 30kVA Pole Transformer Due to the Rated load

M.K.Kim*, J.T.Kim, J.Y.Koo, K.D.Song, Y.O.Cho, B.N.Ha
 HanYang Univ. KERI KEPCO Resersh Center

ABSTRACT

The life of the transformers is significantly dependent upon the rate of thermal deterioration in the employed insulating materials. Therefore, the study should be based on hot-spot temperature considerations for the life expectancy and possible overload of transformer.

We have measured directly temperature of the winding using thermocouples and these test results are compared with those obtained from computer simulation.

In this work, our fundamental investigations are well described for the analysis in the thermal distribution of the oil-immersed transformer with the rating of 30kVA.

1. 서론

배전 계통에 연계된 주상변압기는 일반 수용가에 직접 연결되어 있기 때문에 변압기 부하 관리가 적합하게 실시되지 않는 한 항상 전력 계통의 문제가 된다. 특히 정격용량을 초과하는 과부하가 걸리게 되면, 변압기의 온도가 상승하여 사고가 일어날 위험성이 증가하므로, 주상 변압기의 사고를 감소시키기 위해서 권선에서 발생하는 과열점(hot-spot)의 위치와 그곳의 정확한 온도를 밝히는 것은 대단히 중요하다.

변압기 내부의 온도가 상승하게 되면 변압기 절연물은 온도와 시간의 함수관계로 열화되어 절연 성능은 악화되고 변압기의 수명은 감소하게 된다. 한편의 1987년 통계 자료에 의하면 변압기 사고중 자연 열화가 36%, 뇌격 및 과부하로 인한 사고가 14%이며, 특히 하절기에는 고온 다습할 뿐만 아니라 첨두 부하의 증가로 인하여 과부하로 인한 사고가 많이 일어나고 있다.

본 연구에서는 신뢰성 있는 전력 공급을 위한 주상 변압기 사고 감소 대책의 일환으로, 현재 한전 계통의 주상 변압기로 주로 쓰이고 있는 정격 30kVA 일단 접지 주상 변압기를 대상으로 하여 변압기내의 열분포를 100%, 110%, 120%, 130% 부하에서 측정하여 권선에서의 과열점 (hot-spot) 위치와 온도특성을 알아보았다.

실제 배전 계통에 운용되고 있는 변압기는 Duct가 5개 이상이다. 그러나 권선 사이에 온도 센서인 Thermocouple을 부착함에 따른 Duct를 설치할 공간적인 여유가 없기 때문에 시료 변압기는 고압권선과 저압권선 사이에 1개의 Duct를 설치할 수 밖에 없었다. Duct 5개인 실운용 변압기에는 온도 센서를 부착하여 직접 측정 시험이 곤란하므로, 본 연구를 수행함에 있어서 실제 변압기 권선의 열분포 및 온도특성을 다음과 같이 해석하였다 :

- (1) Duct가 1개인 시료 변압기의 열분포를 100%, 110%, 120%, 130% 부하에 대해서 측정
- (2) 열분포 해석용 Software를 이용하여 시료 변압기를 정격 부하 상태에서 Simulation한 결과를 시험치와 비교 검토

- (3) 실제 운용되고 있는 Duct가 5개인 변압기를 정격 부하 상태에서 Simulation하여 변압기내의 열분포 및 온도특성을 해석

2. 실험 방법

(1) 시험 장치 구성

변압기 온도 시험은 실부하법(Actual loading method)과 모의부하법(Simulated method)이 있으며 모의부하법에는 단락법(Short - circuit method)과 반환부하법>Loading back - method)이 있다. 실부하법은 다른 방법보다 정확한 결과를 얻을 수 있으나, 실험 규모의 대형화와 제작상 경제적인 어려움이 따르기 때문에 본 연구에서는 모의부하법중 반환부하법으로 시험하였다.

반환부하법은 두대의 시료 변압기 2차측을 병렬 연결하고, 1차측은 동상이되게 병렬로 접속하고, 2차측에 정격 전압을 인가하여 철손을 유발시키고 1차측은 보조변압기를 이용하여 전류를 조정하므로써 동손이 발생하도록 하는 방법이다. 따라서 부하 변동을 위해서 2차 권선에 정격 전류 이상을 인가할 수 있고, 전압 스트레스 (Voltage stress)의 영향을 거의 무시할 수 있으며, 시설비가 적게 들면서 어떠한 용량의 변압기에 대해서도 열분포 측정시험을 할 수 있는 장점을 가지고 있다.

(2) 열분포 측정 방법

변압기내의 온도를 직접 측정하기 위하여 정격 30kVA 권선실 외절형 시료변압기 1대당, 권선부 30개소, 철심부 8개소, 오일 상부(Top-oil level) 3개소, 탱크벽 12개소에 온도 센서로써 Thermocouple을 모두 53개 설치하였다. 센서 출구부분 단자는 변압기 내부의 절연유가 분출되지 않도록 epoxy molding하여 단차처리를 하였고, 주위온도를 측정하기 위해서 두대의 변압기 주위 4개소에 센서를 설치하여 총 110개의 센서를 장착하였다.

시료 변압기에 100%, 110%, 120%, 130% 부하에 해당하는 부하전류를 공급하여 온도가 포화되어 일정한 상태로 된 후 각 부하로 인한 변압기내의 온도를 관측하였다. 센서에서 발생하는 Analog 출력 신호를 A/D변환기를 통해서 Digital 값으로 변환시켜 주는 DAS (Data Acquisition System)를 통해 센서로부터 여러 부하 조건에 따라 관측된 온도 Data는 10분마다 computer에 입력되어 저장되도록 하였다.

3. 시험 결과 및 고찰

(1) 정격 부하에서 온도 특성

A. 권선

정격 부하 상태에서 시료변압기의 고압권선 최외곽 표면(절연지)과 저압권선과 고압권선 사이의 고압권선쪽 절연지 부분의 권선 높이에 따른 주위온도에 대한 온도 상승 분포를 그림1에 나타내었다.

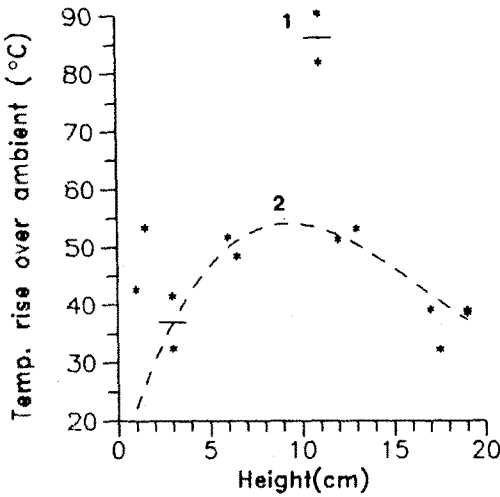


그림 1. 권선부의 높이에 따른 주위온도에 대한 온도 상승
 ① 저압권선과 고압권선 사이의 고압측 절연지
 ② 고압권선 최외각 절연지

일반적으로 권선 높이에 따라 온도가 선형적으로 증가한다고 IEC Publication에는 규정하고 있으나, 그림1의 시험 결과는 과열점(Hot-spot)이 권선의 상부가 아니라 중간 높이에서 나타나고 있다. 고압권선 내부에서도 중간 높이의 온도가 상단부분, 하단부분보다 높게 나타났다.

저압권선 내부에는 변압기 구조상 그리고 기술적인 어려움 때문에 권선 내부층의 온도를 직접 측정할 수 없었다. 따라서 저압 권선 중간층(2층과 3층사이)의 상단과 하단에만 센서를 설치하여 온도를 측정하였다. 저압권선 내부에서 상단의 주위온도에 대한 온도 상승은 69.31°C로 높은 값을 나타내고 있으므로 직접 측정이 곤란한 저압권선 내부의 중간 높이에서는 더욱 온도가 높다고 생각된다

권선의 온도가 선형적으로 권선 높이에 따라서 증가 한다고 가정하여 권선 높이의 1/2 되는 지점의 온도를 권선의 평균 온도라고 규정할 수 없다고 본다.

B. 오일

그림2는 탱크 벽면에 설치된 온도 센서를 이용한 탱크 높이에 따른 오일의 주위온도에 대한 온도 상승 분포를 나타내고 있다. 변압기에서 절연과 냉각의 역할을 하는 오일의 온도특성을 살펴보면, 탱크 높이에 따라 온도는 선형적으로 증가하고 있다. 이 결과는 일반적으로 유압 자냉식 변압기에 대해서 IEC-Publication에 규정한 내용에 잘 일치하고 있으며 Top-oil의 주위온도에 대한 온도 상승은 규격에서 제한하는 55°C를 넘지 않고 있다.

(2) 과부하에서 온도 특성

A. 권선

시료 변압기 2대에 110%, 120%, 130% 부하에 해당하는 부하 전류를 인가하여 시험을 한 결과를 그림3에 나타내었다. 부하가 증가하더라도 과열점의 위치는 변화가 없었으며 110% 부하일 경우 정격에 대해서 온도 상승폭이 크지 않았으나 120%, 130%로 부하가 증가할수록 온도 상승폭이 점점 커짐을 알 수 있다.

B. 오일

그림4는 부하 변화에 따른 오일의 온도 상승 분포를 나타내었다. 오일 온도 상승은 권선에서와는 달리 Tank 높이에 따라서 선형적으로 증가하며 부하가 120%, 130%로 될 경우 온도 상승폭은 점점 커짐을 보여 주고 있다. 즉 과부하가 걸리면 온도 상승이 급격하게 증가됨을 알 수 있다.

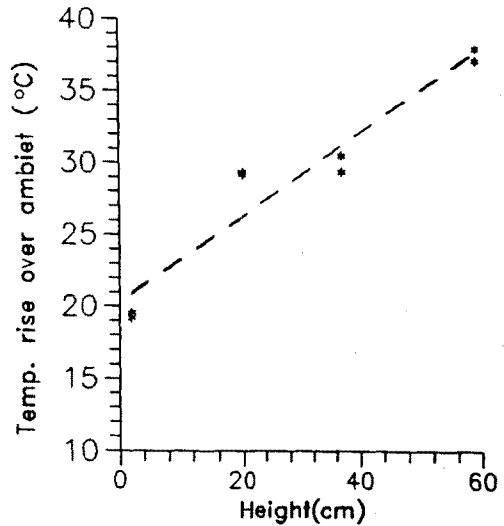


그림 2. 오일의 높이에 따른 주위온도에 대한 온도상승

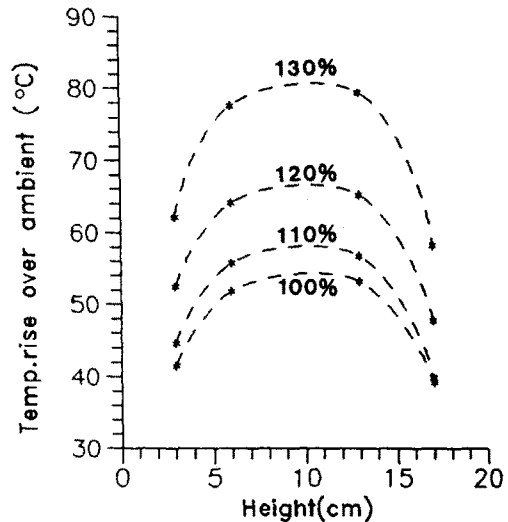


그림 3. 부하 변화에 의한 권선의 높이에 따른 주위온도에 대한 온도상승

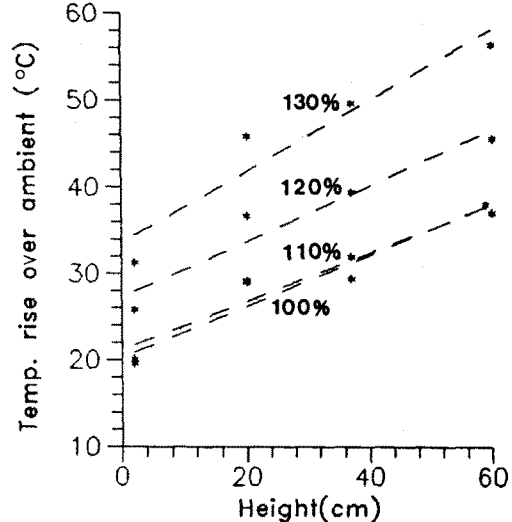


그림 4. 부하 변화에 의한 오일의 높이에 따른 주위온도에 대한 온도 상승

4. 시료 변압기의 Simulation

시료 변압기를 제작하여 직접 측정 한 시험 결과와 Computer Simulation을 한 결과를 비교 검토하였다.

실제 운용 상태를 고려하여 주위온도를 20°C(293 K), 외기의 풍속을 3m/s로 가정하였으며 실제 변압기에 설치되어 있는 Radiator를 감안하여 탱크의 크기를 고려하였다.

권선의 Modeling 과정에서 절연지와 도체인 Coil의 구조를 도체인 Coil을 내부에 두고 절연지를 외부에 배치하였다. 이렇게 Modeling을 하더라도, 권선의 열전도에서 Coil은 열전도도가 매우 크므로 내부에서의 열축적은 없다고 볼 수 있고, 절연지의 두께는 아주 작으므로 열전도 경로 또한 짧기 때문에 전체적인 변압기내의 열분포는 차이가 없다.

또한 시험 결과인 권선 외부에서의 온도 분포와 Simulation결과를 비교하는 것이므로 Modeling을 간략화하여 Grid수를 최적화함으로써 계산 속도를 빠르게 하고 여러번의 계산을 통해 오차를 줄이는데 중점을 두었다.

Simulation 결과, 열분포 시료 변압기의 권선 높이에 따른 온도 분포를 그림5에 나타내었다. 절연지의 온도가 가장 높은 곳은 주절연 사이의 고압측에서 나타나며 온도는 385.5 K로 주위 온도에 대해서 92.5°C의 온도 상승을 보이고 있다. 시험 결과 역시 고압측 절연지의 중간 높이(11cm)에서 90.46°C의 온도 상승이 나타났다. 시험치와 Simulation 결과는 온도 분포나 온도 상승값이 거의 비슷하게 나타나고 있다.

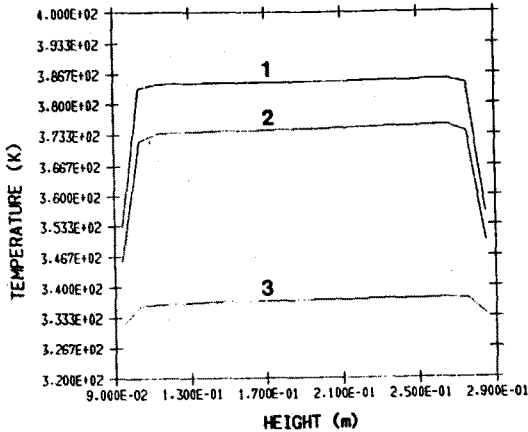


그림 5. 오일에 노출된 권선부의 높이에 따른 온도 분포 (Duct 1개인 시료 변압기, 주위 온도 20°C)
 ① 저압권선과 고압권선 사이의 고압측 절연지
 ② 저압권선과 고압권선 사이의 저압측 절연지
 ③ 고압권선 최외각 절연지

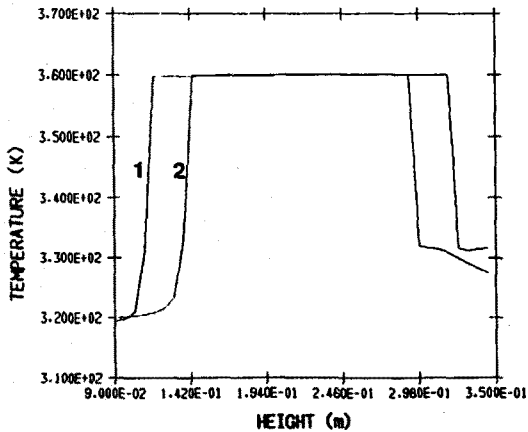


그림 6. 오일에 노출된 권선부의 높이에 따른 온도 분포 (Duct 5개인 실용용 변압기, 주위 온도 20°C)

5. 실용용되고 있는 변압기의 Simulation

실제 운용되고 있는 Duct가 5개인 변압기의 고압권선은 내부 권선의 권수가 외부 권선의 권수 보다 적기 때문에 권선 높이에 약간 차이가 있으나, Boundary condition은 Duct가 1개인 시료 변압기의 Simulation에서와 동일하다.

그림6은 권선의 높이에 따른 도체의 온도 분포를 나타내고 있다. 도체의 온도는 저압권선과 고압권선이 거의 동일한 값을 나타내고 있으며 최고 온도는 360 K로 주위온도에 대해서 67°C의 온도 상승을 보이고 있다. 권선 높이에 따른 온도 변화가 없는것은 권선 폭보다 권선 높이가 훨씬 크므로 축방향으로 열전도되는 열량이 반경 방향으로 열전도되는 열량에 비해 무시할 정도로 작다고 볼 수 있다.

그림7은 권선 중간 높이에서 반경 방향의 온도 분포를 나타내고 있다. 고압권선과 저압권선의 온도는 거의 동일하게 나타났으며, 권수가 많은 외부 권선에서는 발열량이 많으므로 내부 권선보다는 온도가 약간 높게 나타나고 있다. 또한 도체 Coil을 중심으로 온도 분포가 대칭을 이루고 있다.

그림8은 철심으로 둘러 싸여 있는 권선 및 철심의 반경 방향으로의 온도 분포를 나타내고 있으며, 철심의 온도는 오일에 직접 접하고 있는 부분보다 반대편의 부분이 높은 것을 알 수 있다. Hot-spot는 철심으로 둘러 싸여 있는 고압권선에서 나타나고 있으며 그 값은 365 K로 주위온도에 대해서 72°C의 온도 상승을 나타내고 있고, 오일에 노출된 권선부보다 5°C 높은 값이다. 그림8에서 온도가 가장 높은 고압권선 사이의 절연지 온도는 365 K로 권선 도체의 온도와 거의 같다.

절연지의 온도는 변압기의 수명을 예측하는데 매우 중요한 요소이다. 변압기 수명을 예측하는 방법중의 하나인 Arrhenius 법칙은 절연 물질의 열화 정도를 나타내는 것으로 1976년 IEC, Publication 76에 의하면 Hot-spot의 온도가 98°C 이상이 될 경우 절연 열화로 인한 절연 파괴가 시작된다고 보고하고 있다. 권선 자체의 온도도 변압기 온도 특성을 규명하는데 중요한 요소이지만 절연지의 온도는 변압기 절연 파괴 메커니즘 규명에 매우 중요한 요소가 된다.

Simulation결과에 의하면 100% 부하에서 Hot-spot의 절연지 온도 상승은 72°C로 나타나므로 주위온도가 높은 하절기에는 철두 부하의 증가로 인한 과부하 상태가 되면 A종 절연의 제한 온도인 105°C를 넘게된다. 이러한 경우 절연 열화가 심하게 발생하여 전기적 스트레스를 받을 경우 절연파괴가 쉽게 되리라고 판단된다.

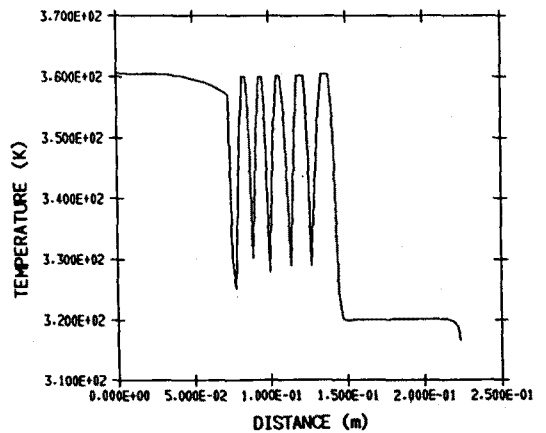


그림 7. 오일에 노출된 권선부에서 반경 방향의 온도 분포 (Duct 5개인 실용용 변압기, 주위온도 20°C, 권선 중간 높이)

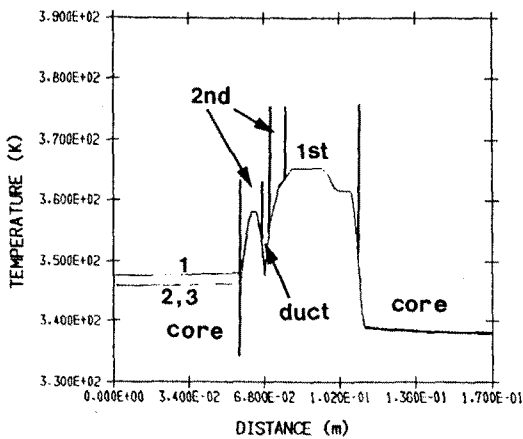


그림 8. 철심으로 둘러싸여 있는 권선부에서 반경 방향의 온도 분포

(Duct 5개인 실운용 변압기, 주위 온도 20°C)

- ① 권선 중간 높이
- ② 권선 상단
- ③ 권선 하단

6. 결론

주상 변압기 사고 방지 대책에 대한 연구를 위하여 100%, 110%, 120%, 130% 부하에서 열분포 측정 시험과 시료 변압기의 Simulation을 통해서 얻은 결과를 토대로 하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

실제 운용되고 있는 30kVA 주상 변압기 각 부분의 주위온도에 대한 온도 상승은 다음과 같다 :

- ① 오일에 노출된 권선부
 - 도체의 최고 온도 상승 [고압 권선 : 67.3°C
 - [저압 권선 : 66.8°C
 - 절연지의 최고 온도 상승 : 61°C
- ② 철심으로 둘러싸여 있는 권선부
 - 도체의 최고 온도 상승 : 72.4°C
 - 절연지의 최고 온도 상승 : 72.4°C
- ③ 철심의 온도 상승
 - 오일과 접하고 있는 부분 : 45°C
 - 다른쪽 철심과 접하고 있는 부분 : 54°C

변압기 수명 예측을 위하여 권선의 Hot-spot 온도는 최근에 주로 응용하고 있는 Arrhenius 법칙에서도 요구되고 있으며, 또한 변압기를 운전하는데 있어서도 온도 상승이 제한되어 있기 때문에 권선의 Hot-spot 온도는 대단히 중요하다.

이제까지의 연구 보고서에는 Hot-spot의 위치가 어디이며, 어느 정도의 온도값을 나타내는가를 명확하게 언급하고 있지 않다. 본 연구의 결과 권선의 Hot-spot는 철심으로 둘러싸여 있는 권선부의 고압 권선에서 나타나고 있으며 그곳의 주위온도에 대한 온도 상승은 72°C로 나타났다. 이것은 오일에 노출된 권선 부분보다 5°C 정도 높은 값으로 1988년 Canada에서 계산식으로 예측한 값보다 2°C 높은 값이다.

유입식 변압기의 정격 부하에서 Hot-spot의 온도는 권선의 평균 온도보다 10°C를 넘지 않는다는 가정하에 A종 절연의 Hot-spot의 온도 제한은 105°C이다. 본 연구에서 Hot-spot의 온도 상승은 72°C이므로 규격에서 제한하고 있는 65°C(규격에서 제한하고 있는 권선의 평균 온도는 55°C)보다 8°C 높게 나타나고 있다. 또한 Hot-spot에서의 절연지의 온도 상승도 동일하게 72°C를 나타내고 있으므로 절연지의 온도가 6°C 또는 8°C 증가 할때마다 변압기의 수명이 반감된다고 볼 때 이 부분에서의 냉각이 절실히 필요하다고 본다

- Reference -

- [1] L. Kiss, "Large Power Transformers" 1987, p351-534
- [2] J.P. Holman, "Heat Transfer" (1986)
- [3] ANSI/IEEE C 57-91, 1981, "Guide for loading mineral-oil immersed overhead and pad-mounted distribution transformer"
- [4] IEC, publ. 76-2, 1976, "Power Transformers part 2 - Temperature rise"
- [5] IEC, publ. 354, 1972, "Loading guide for oil-immersed transformers"
- [6] V. M. Montsinger, "Transformer Engineering"